



10/58996 22.04.03

Mod. C.E. - 1-4-7

REC'D 29 APR 2003

WFO

PCT

**Ministero delle Attività Produttive**  
*Direzione Generale per lo Sviluppo Produttivo e la Competitività*  
*Ufficio Italiano Brevetti e Marchi*  
*Ufficio G2*

Autenticazione di copia di documenti relativi alla domanda di brevetto per:

Invenzione Industriale

N.

TO2002 A 000274



*Si dichiara che l'unita copia è conforme ai documenti originali  
depositati con la domanda di brevetto sopraspecificata, i cui dati  
risultano dall'accluso processo verbale di deposito.*

Inoltre verbale di deposito di Istanza depositato alla Camera di Commercio di Torino n. TOR0319  
del 24/05/2002 (pag. 1) per il deposito dei disegni definitivi (pagg. 5).

**PRIORITY  
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Roma, li ..... 6 APR. 2003

IL DIRIGENTE

*Massimo Piergallini*  
Dr. Massimo Piergallini

**BEST AVAILABLE COPY**

## AL MINISTERO DELL'INDUSTRIA DEL COMMERCIO E DELL'ARTIGIANATO

MODULO A

UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI - ROMA

DOMANDA DI BREVETTO PER INVENZIONE INDUSTRIALE, DEPOSITO RISERVE, ANTICIPATA ACCESSIBILITÀ AL PUBBLICO

## A. RICHIEDENTE (I)

1) Denominazione INFN ISTITUTO NAZIONALE PER LA FISICA DELLA MATERIA EN  
Residenza GENOVA GE codice 02790810101

2) Denominazione UNIVERSITA' DI CAMBRIDGE  
Residenza CAMBRIDGE CB3 0HE GRAN BRETAGNA codice

## B. RAPPRESENTANTE DEL RICHIEDENTE PRESSO L'U.I.B.M.

cognome e nome ANGELO GERBINO ed altri. cod. fiscale  
(Iscl. No. 488BM)  
denominazione studio di appartenenza Jacobacci & Partners S.p.A.  
via Corso Regio Parco n. 27 città TORINO cap 10152 (prov) TO

## C. DOMICILIO ELETTIVO destinatario

via n. città cap (prov)

## D. TITOLO

classe proposta (sez/cl/sci)

gruppo/sottogruppo

LASER THZ A SEMICONDUTTORE INCORPORANTE GUIDA D'ONDA A CONFINAMENTO  
PLASMONICO CONTROLLATO

ANTICIPATA ACCESSIBILITÀ AL PUBBLICO: SI ☐ NO ☒

SE ISTANZA: DATA N° PROTOCOLLO

## E. INVENTORI DESIGNATI

cognome nome

cognome nome

1) TREDICUCCI ALESSANDRO 3) BEERE HARVEY EDWARD  
2) BELTRAM FABIO 4) DAVIES ALEXANDER GILES

## F. PRIORITÀ

nazione o organizzazione

tipo di priorità

numero di domanda

data di deposito

allegato  
S/R

SCIOGLIMENTO RISERVE

Data

N° Proto

1) 2) 3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20)

## G. CENTRO ABILITATO DI RACCOLTA CULTURE DI MICRORGANISMI, denominazione

## H. ANNOTAZIONI SPECIALI

I TITOLARI PARTECIPANO AI DIRITTI SUL BREVETTO NELLE SEGUENTI MISURE:  
INFN ISTITUTO NAZIONALE PER LA FISICA DELLA MATERIA 60%  
UNIVERSITA' DI CAMBRIDGE 40%, AI SENSI DELL'ART. 19 R.D. 1127/39

## DOCUMENTAZIONE ALLEGATA

N. es.

Doc. 1) 2 PROV n. pag. 27 riassunto con disegno principale, descrizione e rivendicazioni (obbligatorio 1 esemplare) ....  
Doc. 2) 2 PROV n. tav. 05 disegno (obbligatorio se citato in descrizione, 1 esemplare) .....  
Doc. 3) 1 RIS dichiarazione sostitutiva di certificazione  
lettere d'incarico, procure o dichiarazioni procure generali  
Doc. 4) 0 RIS designazione inventore .....  
Doc. 5) 0 RIS documenti di priorità con traduzione in italiano .....  
Doc. 6) 0 RIS autorizzazione o atto di cessione .....  
Doc. 7) 0 nominativo completo del richiedente

SCIOGLIMENTO RISERVE  
Data N° Protocollo  
confronta singole priorità

8) attestati di versamento, totale lire

DUECENTONOVANTUNO/80COMPILATO IL 27/03/2002

FIRMA DEL (I) RICHIEDENTE (I)

CONTINUA SINO 57DEL PRESENTE ATTO SI RICHIEDE COPIA AUTENTICA SINO 57

Jacobacci &amp; Partners S.p.A.

C.C.I.A.A. DI TORINO

VERBALE DI DEPOSITO

NUMERO DI DOMANDA

10 2002 A 000 274codice 01L'anno millenovecentoDue miladue

il giorno

ventisette

del mese di

MarzoIl (I) richiedente (I) sopraindicato (I) ha (hanno) presentato a me sottoscritto la presente domanda, corredata di n. 01 fogli aggiuntivi per la concessione del brevetto sopraindicato.

## I. ANNOTAZIONI VARIE DELL'UFFICIO ROGANTE

IL DEPOSITANTE

SHINO OFFICIALEUFFICIO  
dell'Ufficio

L'UFFICIALE ROGANTE

Mirella CAVALLARI

01 01

FOGLIO AGGIUNTIVO n. ☐ di totali ☐

DOMANDA N.

10

2002 A000274

AGGIUNTA MODULO A

REG. A

## A. RICHIEDENTE (I)

N.G.

|                          |               |  |        |                          |
|--------------------------|---------------|--|--------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Denominazione |  |        | <input type="checkbox"/> |
|                          | Residenza     |  | codice |                          |
| <input type="checkbox"/> | Denominazione |  |        | <input type="checkbox"/> |
|                          | Residenza     |  | codice |                          |
| <input type="checkbox"/> | Denominazione |  |        | <input type="checkbox"/> |
|                          | Residenza     |  | codice |                          |
| <input type="checkbox"/> | Denominazione |  |        | <input type="checkbox"/> |
|                          | Residenza     |  | codice |                          |
| <input type="checkbox"/> | Denominazione |  |        | <input type="checkbox"/> |
|                          | Residenza     |  | codice |                          |
| <input type="checkbox"/> | Denominazione |  |        | <input type="checkbox"/> |
|                          | Residenza     |  | codice |                          |

## E. INVENTORI DESIGNATI

05 KOHLER RUEDEGER

cognome nome

06 LINFIELD EDMUND HAROLD

|                          |  |                          |  |
|--------------------------|--|--------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |

## F. PRIORITÀ

| nazione o organizzazione | tipo di priorità | numero di domanda | data di deposito | allegato S/R             |
|--------------------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------------|
| <input type="checkbox"/> |                  |                   |                  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> |                  |                   |                  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> |                  |                   |                  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> |                  |                   |                  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> |                  |                   |                  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> |                  |                   |                  | <input type="checkbox"/> |

## SCIOGLIMENTO RISERVE

Data N° Protocollo

|                          |  |                          |  |
|--------------------------|--|--------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |
| <input type="checkbox"/> |  | <input type="checkbox"/> |  |

FIRMA DEL (I) RICHIEDENTE (I)

ANGELO PERBINO

(Iscri. No. 180000)

Jacobacci &amp; Partners S.p.A.

SPAZIO RISERVATO ALL'UFFICIO CENTRALE BREVETTI

NUMERO DOMANDA

2002 A000274

REG. A

NUMERO BREVETTO

DATA DI DEPOSITO

27/03/2002

DATA DI RILASCIO

/ /

## A. RICHIEDENTE (I)

Denominazione

INFN ISTITUTO NAZIONALE PER LA FISICA DELLA MATERIA

Residenza

GENOVA GE

## D. TITOLO

LASER THZ A SEMICONDUCTORE INCORPORANTE GUIDA D'ONDA A CONFINAMENTO PLASMONICO CONTROLLATO

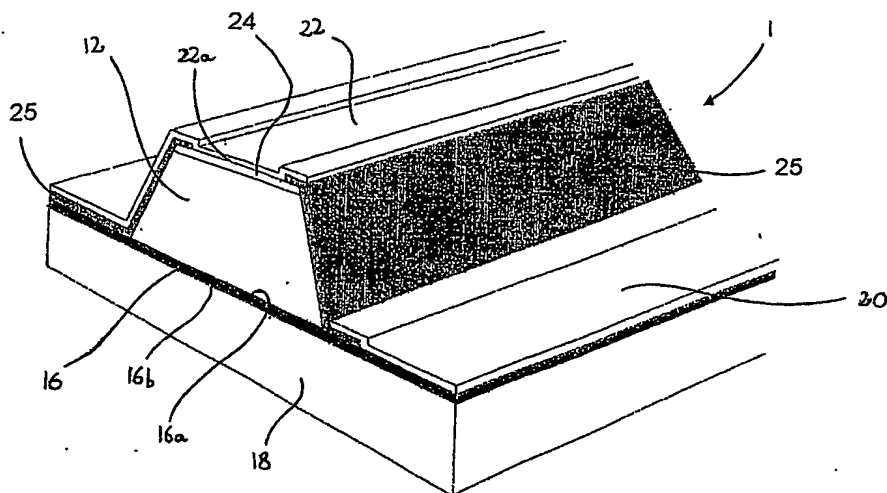
Classe proposta (sez./cl./scl.)

(gruppo/sottogruppo)

## L. RIASSUNTO

Un laser a semiconduttore comprende una regione attiva (12) che, in risposta ad un'energia di pompaggio ad essa applicata, è in grado di produrre un'emissione stimolata di radiazione con una lunghezza d'onda (1) centrale nella regione dell'infrarosso lontano, ed una regione di confinamento (16, 18, 22), atta a confinare la radiazione nella regione attiva (12) e comprendente almeno una interfaccia plasmonica di superficie generati da un'interazione dell'interfaccia con la radiazione. La regione di confinamento (16, 18, 22) comprende uno strato di guida d'onda (16), delimitato su lati opposti da una prima e da una seconda interfaccia (16a, 16b). Lo strato di guida (16) è drogato in modo tale che le interfacce (16a, 16b) sono rispettivamente in grado di supportare i modi plasmonici, ed è di uno spessore (d) tale da determinare all'esterno dello strato (16) stesso l'accumulazione dei modi plasmonici in corrispondenza delle interfacce (16a, 16b) ed al suo interno una soppressione di tali modi plasmonici. (Figura 1)

## M. DISEGNO



DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:

"Laser THz a semiconduttore incorporante guida d'onda a confinamento plasmonico controllato"

di: INFN ISTITUTO NAZIONALE PER LA FISICA DELLA MATERIA, nazionalità italiana, Corso F. Perrone, 24 - 16152 Genova

UNIVERSITA' DI CAMBRIDGE, nazionalità britannica, Madingley Road, Cambridge CB3 0HE, Gran Bretagna  
Inventori designati: Alessandro TREDICUCCI, Fabio BELTRAM, Harvey Edward BEERE, Alexander Giles DAVIES, Rüdiger KÖHLER, Edmund Harold LINFIELD

Depositata il: 27 Marzo 2002

\* \* \*

DESCRIZIONE

La presente invenzione si riferisce ad un laser a semiconduttore, del tipo descritto nel preambolo della rivendicazione 1.

E' comunemente noto che la regione di frequenze 1-10 THz (definita anche lontano infrarosso) è difficilmente accessibile da sorgenti basate su dispositivi a semiconduttore o più generalmente a stato solido (R. E. Miles et al., Terahertz Sources and Systems, NATO ASI Series, Kluwer 2001). Infatti i componenti elettronici basati sull'oscillazione di cariche libere come i diodi Gunn o a effetto

2002 A000274

tunnel risonante sono in grado di raggiungere al massimo frequenze di un centinaio di GHz. Dall'altro lato dello spettro, i laser a diodo convenzionali funzionanti su transizioni ottiche dalla banda di conduzione a quella di valenza del materiale semiconduttore sono tipicamente limitati a frequenze del visibile o vicino/medio infrarosso ( $>30$  THz).

L'interesse tecnologico per questa regione dello spettro è tuttavia molto alto, viste le molteplici esigenze in campo spettroscopico, delle comunicazioni senza filo, e della produzione di immagini per scopi medici o di controlli di sicurezza. Infatti, le particolari caratteristiche di trasparenza o opacità delle varie sostanze in questo intervallo di frequenze, ben si prestano all'indagine di tessuti biologici (in maniera analoga e complementare ai raggi X) o per l'utilizzo in operazioni di sorveglianza dove occorra esaminare oggetti nascosti alla vista da indumenti o contenitori plastici. La trasparenza dei materiali da costruzione e la grossa larghezza di banda disponibile fanno infine di queste frequenze un'ottima scelta per le comunicazioni intra-edificio del futuro.

I laser a cascata quantica (QCL) recentemente sviluppati offrono in linea di principio la possi-

bilità di generare radiazione elettromagnetica nel lontano infrarosso. Si tratta, infatti, di dispositivi unipolari operanti su transizioni tra sottobande di stati appartenenti alla medesima banda di conduzione risultanti dal confinamento quantistico degli elettroni in un'eterostruttura essenzialmente bidimensionale (J. Faist et al., Science 264, 553, 1994). La separazione energetica tra tali sottobande, e dunque la frequenza dei fotoni emessi, dipende pertanto principalmente dallo spessore degli strati semiconduttori in cui gli elettroni sono confinati e non dalla struttura elettronica del materiale originale. Allo stato attuale QCL sono stati realizzati a coprire tutto il medio infrarosso, fino alla lunghezza d'onda massima di 24  $\mu\text{m}$  (12.5 THz) (R. Colombelli et al., Appl. Phys. Lett. 78, 2620, 2001). Tuttavia la realizzazione di un QCL operante nei THz è rimasta sino ad oggi impraticabile per svariati motivi. In primo luogo la necessità di sviluppare guide d'onda di spessori compatibili (10  $\mu\text{m}$  circa) con il sistema di crescita dei QCL (epitassia da fasci molecolari o MBE) in grado di confinare efficacemente radiazione di lunghezza d'onda molto maggiore ( $\sim 100 \mu\text{m}$ ) senza innalzare le perdite ottiche a valori proibitivi. In secondo



luogo la necessità di progettare il disegno della regione attiva in maniera da garantire l'inversione di popolazione necessaria a compensare le perdite della cavità. Quest'ultima richiesta risulta più complessa rispetto ai QCL convenzionali per il fatto che le energie in gioco diventano minori di quella del fonone ottico. Questo cambia completamente la dinamica dei processi di rilassamento non-radiativi e richiede un diverso approccio su cui basare l'ingenerizzazione della struttura elettronica.

Lo stato dell'arte attuale vede pertanto soltanto l'esistenza di dispositivi QC capaci di emissione spontanea alle frequenze qui di interesse (con potenze nei THz dell'ordine della decina di pW) senza alcuna evidenza di azione laser, né, tanto meno, di guadagno (M. Rochat et al., Appl. Phys. Lett. 73, 3724, 1998 e J. Ulrich et al., Appl. Phys. Lett. 76, 19, 2000).

Il presente dispositivo, analogamente agli altri laser a semiconduttore, è composto da un materiale attivo in cui, grazie ad iniezione elettronica, viene generata la radiazione elettromagnetica. Questo è inserito all'interno di una guida d'onda capace di confinare la radiazione nella regione di

JACOBACCI & PARTNERS SpA



spazio occupata appunto dal materiale attivo e che definisce le dimensioni laterali della cavità ottica necessaria per l'operazione del laser. Data la caratteristica struttura bi-dimensionale della regione attiva dei QCL, è necessario implementare una guida d'onda di tipo planare che provveda al confinamento della radiazione nella direzione di crescita del materiale semiconduttore, lasciando la definizione della cavità nelle direzioni ortogonali semplicemente a procedure di fabbricazione del dispositivo (litografia, ecc.). A frequenze del visibile, o del vicino e medio infrarosso, tale guida d'onda si ottiene comunemente racchiudendo il materiale attivo tra due o più strati di un diverso semiconduttore dall'indice di rifrazione minore. Grazie al principio della riflessione interna totale, si realizza così, com'è noto, quella che viene normalmente chiamata una guida d'onda dielettrica dal funzionamento analogo alle fibre ottiche. Questo approccio non è tuttavia applicabile per frequenze nei THz (lunghezze d'onda di circa 100  $\mu\text{m}$ ) poiché richiederebbe spessori degli strati semiconduttori dell'ordine o maggiori della lunghezza d'onda, assolutamente impraticabili per le tecniche di crescita (MBE, MOCVD) comunemente impiegate. Inoltre,

trattandosi di dispositivi ad iniezione, i semiconduttori impiegati devono avere un certo livello di drogaggio per garantire proprietà di trasporto ottimali. Questo si tradurrebbe in perdite per assorbimento molto elevate in quanto il coefficiente di assorbimento "k" dei portatori liberi in un semiconduttore drogato è proporzionale alla lunghezza d'onda al quadrato e diviene perciò enorme nel lontano infrarosso (P. Y. Yu and M. Cardona, *Fundamentals of Semiconductors*, Springer-Verlag, Berlin, 1996). Recentemente, per lo sviluppo dei QCL di lunghezza d'onda superiore ai 15  $\mu\text{m}$ , si è impiegata una nuova guida d'onda basata sui plasmoni di superficie (C. Sirtori, et al. *Opt. Lett.* 23, 1366, 1998; A. Tredicucci et al., *Appl. Phys. Lett.* 76, 2164, 2000). Questi ultimi sono modi ottici confinati all'interfaccia tra due materiali con costante dielettrica di segno opposto, quali ad esempio un metallo ed un semiconduttore. Sono polarizzati TM (e quindi ben si adattano ai QC laser che emettono luce polarizzata TM) e presentano un profilo del campo elettrico col massimo all'interfaccia ed un decadimento esponenziale da entrambi i lati nella direzione ortogonale alla superficie. Detta  $\epsilon_1$  la costante dielettrica del metallo ed  $\epsilon_2$  quella del

semiconduttore, la penetrazione del plasmone di superficie nei due materiali è data da:

$$\delta_{1,2} = \frac{\lambda}{2} \left| \operatorname{Re} \left[ \varepsilon_{1,2} \sqrt{\frac{-1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \right] \right|^{-1} \quad (1)$$

La penetrazione nello strato metallico sarà dunque minore quanto più negativa è la sua costante dielettrica [ $\operatorname{Re}(\varepsilon) = n^2 - k^2$ ]. Quest'aspetto è importante perché il metallo è notevolmente assorbente ( $k \gg 1$ ) ed una penetrazione del modo ottico troppo pronunciata sarebbe causa di perdite inaccettabili. Ciò spiega perché le guide d'onda basate sui plasmoni di superficie sono efficaci solo per laser di lunghezza d'onda abbastanza lunga ( $\lambda > 15 \mu\text{m}$ ), dove le costanti dielettriche dei metalli diventano sempre più negative ( $k^2 \gg n^2$ ).

L'ordine di grandezza della perdite nelle guide d'onda a plasmone di superficie realizzate nei QC laser di lunghezza d'onda maggiore è di un centinaio di  $\text{cm}^{-1}$  (A. Tredicucci et al., Appl. Phys. Lett. **76**, 2164, 2000; R. Colombelli et al., Appl. Phys. Lett. **78**, 2620, 2001). Inoltre, dalla formula precedente, considerato che la costante dielettrica del semiconduttore è relativamente piccola e quasi esattamente reale, appare anche evidente che la pe-



netrazione nel semiconduttore è circa inversamente proporzionale a quella nel metallo (e quindi nel lontano infrarosso può diventare anche molto rilevante). Queste caratteristiche fanno sì che anche una guida d'onda a plasmone di superficie del tipo finora utilizzato non sia utilizzabile con successo per un laser THz.

Scopo della presente invenzione è fornire un dispositivo laser in grado di superare gli inconvenienti suddetti, e che sia quindi capace di operare in modo efficace a frequenze 1-10 THz.

Secondo l'invenzione tale scopo è raggiunto da un dispositivo laser avente le caratteristiche definite nella rivendicazione 1.

Forme preferenziali di realizzazione sono descritte nelle rivendicazioni dipendenti.

In un dispositivo laser così costruito, la guida d'onda comprende uno strato semiconduttore altamente drogato (preferibilmente con una concentrazione di portatori dell'ordine di  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), il quale possiede una costante dielettrica negativa, ma con modulo opportunamente accordato allo spessore dello strato medesimo (preferibilmente di alcune centinaia di nm) e alla costante dielettrica del materiale circostante. Questo permette la formazio-

ne di un peculiare modo ottico fortemente confinato su dimensioni anche minori della lunghezza d'onda nel materiale con allo stesso tempo fattori di attenuamento assai bassi dell'ordine di  $10 \text{ cm}^{-1}$ .

Un vantaggio di questa soluzione consiste inoltre nella possibilità di utilizzare tale strato drogato per la realizzazione di un contatto elettronico con la regione attiva del laser rendendo così fattibile l'impiego di substrati non drogati assai meno assorbenti di quelli drogati comunemente usati nei QCL.

L'impiego di questa guida d'onda di nuovo disegno consente perdite ottiche nel dispositivo reale di appena  $17 \text{ cm}^{-1}$  con un fattore di confinamento della radiazione sulla regione attiva di 0.46 ad una lunghezza d'onda di 70 micron. Queste caratteristiche estremamente favorevoli permettono l'ottenimento dell'azione laser anche con materiali attivi dove l'inversione di popolazione è minima e il guadagno limitato, come nel caso delle strutture QC progettate finora in questa regione dello spettro elettromagnetico.

Ulteriori vantaggi e caratteristiche risulteranno evidenti dalla seguente descrizione dettagliata facendo riferimento ai disegni allegati, in

cui:

- la figura 1 è una vista schematica in prospettiva di una forma di realizzazione della presente invenzione in un dispositivo laser Fabry-Perot con cavità a ridge. Lo strato isolante può essere rimosso limitando la metallizzazione del contatto superiore alla cima della striscia. Questo è fattibile per larghezze della striscia  $> 100$  micron;

- la figura 2 è un grafico che mostra il profilo calcolato del modo ottico fondamentale TM confinato dalla presenza di uno strato spesso 800 nm di GaAs drogato  $n$  in  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  all'interno di GaAs nominalmente non drogato. La lunghezza d'onda della radiazione è 70 micron;

- la figura 3 è un grafico che mostra il profilo calcolato del modo ottico fondamentale TM all'interno del dispositivo finito secondo la forma di realizzazione della figura 1. Il contatto metallico superiore è stato simulato considerando uno spessore di 300 nm e i valori reperiti in letteratura per l'oro alla lunghezza d'onda di operazione di 70 micron. Il fattore di attenuamento del modo risulta di circa  $17 \text{ cm}^{-1}$  con un fattore di confinamento sulla regione attiva (indicata dall'area in

grigio) di 0.46;

- la figura 4 è un grafico che mostra lo spettro di emissione da una faccetta della forma di realizzazione del Fabry-Perot della figura 1, lungo 1.2 mm e largo 150  $\mu\text{m}$ , in funzione della corrente impulsata applicata. Temperatura di circa 8 K, e

- la figura 5 è un grafico che mostra la potenza emessa in funzione della corrente applicata per il dispositivo della figura 1 a varie temperature. La soglia per l'emissione laser è di circa 450 A/cm<sup>2</sup>. Temperatura massima di operazione 45 K.

Con riferimento alla figura 1, un laser a semiconduttore 10 comprende una regione attiva 12, in grado di produrre un'emissione stimolata di radiazione con una lunghezza d'onda centrale nella regione dell'infrarosso lontano, in risposta ad un'energia di pompaggio ad essa applicata.

Inferiormente la regione attiva 12 è delimitata da uno strato sottile di guida d'onda 16, il quale è interposto fra la regione attiva 12 ad un substrato 18. Lo strato di guida 16 forma quindi con la regione attiva 12 un'interfaccia 16a, e con il substrato 18 un'interfaccia 16b.

Lo strato di guida 16 è formato da un semiconduttore ad alto drogaggio, preferibilmente con una



concentrazione dei portatori di maggioranza dell'ordine di  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

Il sottile strato 16 semiconduttore altamente drogato si trova in condizioni tali che la frequenza di plasma del gas elettronico risiede nel medio infrarosso e, pertanto, la parte reale della costante dielettrica dello strato diventa negativa a frequenze nei THz, pur restando (in modulo) di grandezza più o meno comparabile a quella di un semiconduttore non drogato. Come si può vedere nella figura 2, uno strato sottile avente le caratteristiche dello strato 16 ed inserito all'interno di una normale struttura semiconduttrice consente in queste circostanze la formazione di un modo TM fortemente confinato a ridosso dello strato medesimo. Qui è riportato il profilo di intensità calcolato per un tale modo alla lunghezza d'onda di  $70 \mu\text{m}$  in un campione di GaAs non drogato con al suo interno uno strato di  $800 \text{ nm}$  di GaAs drogato  $n$  in  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Si nota bene come la radiazione sia confinata su uno spessore totale di appena una decina di micron, con un pronunciato massimo nell'intorno dello strato drogato ma con pochissima intensità al suo interno.

L'origine fisica di questo modo può essere



qualitativamente compresa nella maniera seguente.

La costante dielettrica negativa  $\epsilon_1$  dello strato drogato fa sì che le interfacce di questo con il semiconduttore normale siano in grado di supportare modi plasmonici di superficie. Il suo essere solo debolmente negativa impone però una considerevole penetrazione all'interno dello strato drogato che, unitamente al suo minimo spessore, risulta in un accoppiamento dei plasmoni superficiali delle due interfacce a formare il nuovo modo riportato in figura 2. L'estensione spaziale di quest'ultimo nel semiconduttore circostante viene controllata dalla grandezza della costante dielettrica dello strato drogato (che può essere modificata variando il grado di drogaggio). Come già osservato con riferimento all'espressione (1), infatti, tale estensione è, in prima approssimazione, direttamente proporzionale alla radice di  $-(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ , e quindi una  $\text{Re}(\epsilon_1)$  negativa ma minima risulta nel confinamento più stretto della radiazione. Questo tuttavia non incrementa in maniera inaccettabile le perdite del modo, come nel caso di un semplice plasmone superficiale, dato il piccolo spessore relativo dello strato drogato in rapporto al suo coefficiente di assorbimento. Il confinamento massimo si ottiene più precisamente

allorché  $\text{Re}(\epsilon_1 + \epsilon_2)$  diventa dell'ordine di  $\text{Im}(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ , ovvero a drogaggi dell'ordine  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  per il GaAs. Nella presente forma di realizzazione il miglior rapporto tra ampiezza del modo e perdite si è ottenuto utilizzando un drogaggio  $n$  di  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ed uno spessore di 800 nm, che corrispondono ad un coefficiente di assorbimento del modo di appena  $7 \text{ cm}^{-1}$ , pur mantenendo il confinamento su una ventina di micron.

Facendo nuovamente riferimento alla figura 1, vantaggiosamente lo strato di guida 16 serve come base per la contattazione elettrica della regione attiva 12, mediante un contatto 20 disposto direttamente su di esso. In questo modo è possibile l'utilizzo di substrati non drogati assai più trasparenti nel lontano infrarosso rispetto a quelli convenzionalmente utilizzati. Nella presente forma di realizzazione del dispositivo laser si è dunque provveduto a crescere lo strato drogato 16 direttamente sul substrato 18 di GaAs non drogato, e quindi a crescere la regione attiva 12 descritta più avanti (dello spessore di circa 11 micron). A questo punto la necessità di realizzare un altro contatto elettrico 22, questa volta al di sopra della regione attiva 12, richiede la deposizione di uno

strato metallico.

In una forma di realizzazione preferita del dispositivo laser tale contatto 22 è disposto direttamente sulla regione attiva 12, in modo tale da formare con essa un'interfaccia 22a. Al di fuori dell'interfaccia 22a il contatto 22 è separato dalla regione attiva 12 soltanto da uno strato 24 di GaAs di 200 nm drogato in  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Tale configurazione permette una buona ohmicità del contatto. Uno strato 25 di materiale isolante (ad esempio  $\text{SiO}_2$  o  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) può inoltre essere depositato in precedenza ai lati della striscia (o ridge, di cui si tratterà più diffusamente nel seguito) nel caso in cui le dimensioni laterali di quest'ultima (ad esempio  $< 100 \mu\text{m}$ ) rendano necessaria per il collegamento (bonding) un'estensione della metallizzazione del contatto 22 ben oltre la larghezza della ridge suddetta (queste non sono di per sé le uniche soluzioni possibili ed altre geometrie per la deposizione del contatto superiore si possono prevedere senza peraltro uscire dallo spirito dell'invenzione). La conseguenza peculiare di questa scelta consiste nel fatto che un ulteriore plasmone di superficie legato all'interfaccia 22a col metallo del contatto 22 si mescola col modo della guida d'onda



secondo la presente invenzione risultando nel modo del dispositivo finito riportato in figura 3. L'aumento delle perdite è in buona parte dovuto al drogaggio ancorché basso necessario nella regione attiva 12 e solo in minima parte alla presenza del contatto metallico superiore 22. Il valore di circa  $17 \text{ cm}^{-1}$  è comunque assai basso per una lunghezza d'onda di 70 micron. Il fattore di confinamento  $\Gamma$  del modo sulla regione attiva è di 0.46. Questi valori indicano la necessità di raggiungere un guadagno nella regione attiva 12 di almeno  $30\text{-}40 \text{ cm}^{-1}$ .

In un esempio di realizzazione del dispositivo laser secondo la presente invenzione la regione attiva 12 è basata sull'utilizzo di superreticoli Ga-As/ $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ . Naturalmente l'invenzione non è limitata al tipo particolare di regione attiva del laser, essendo tale invenzione applicabile in generale per emettitori THz polarizzati TM. In tale forma di realizzazione, l'inversione di popolazione si ottiene tramite iniezione elettronica tra gli stati al bordo del primo minigap di energia nei suddetti superreticoli. In particolare sono utilizzati superreticoli a periodo non costante o "chirped" che consentono di mantenere minibande ben delocalizzate anche in presenza del campo elettrico

necessario all'operazione del dispositivo (A. Tredicucci et al., Appl. Phys. Lett. 73, 2101, 1998 and F. Capasso et al., US patent 6,055,254). Su questo approccio sono basate le regioni attive dei QC laser di lunghezza d'onda maggiore (A. Tredicucci et al., Appl. Phys. Lett. 76, 2164, 2000; R. Colombelli et al., Appl. Phys. Lett. 78, 2620, 2001) ed il loro impiego ad energie minori del fonone ottico (cioè a frequenze THz) è stato recentemente discusso (Köhler et al., Appl. Phys. Lett. 79, 3920, 2001). In quest'ultima pubblicazione è stato proposto un particolare disegno del materiale attivo in grado di portare a guadagni dell'ordine di  $30 \text{ cm}^{-1}$ , compatibili dunque con la configurazione di guida d'onda secondo l'invenzione. Una serie di superreticoli "chirped" nominalmente identici a quelli descritti in Köhler et al., Appl. Phys. Lett. 79, 3920, 2001, ed intervallati da opportuni strati disegnati, secondo lo schema consueto dei QCL, per estrarre gli elettroni dalla prima minibanda di un superreticolo ed iniettarli nella seconda di quello del periodo successivo è stata dunque cresciuta nella zona destinata al materiale attivo del dispositivo laser. Per coprire gli 11 micron richiesti sono stati necessari un totale di 104 gruppi

SL/iniettore. La struttura completa del campione realizzato in grado di emettere ad una lunghezza d'onda centrale di  $\lambda=69\mu\text{m}$ , è riportata in dettaglio nella tabella 1 seguente. Tale struttura ha uno spessore complessivo di  $11,9643\mu\text{m}$ , più lo spessore del substrato.

TABELLA 1

| TIPO            | COMPOSIZIONE                      | DROGAGGIO                            | SPESSORE |                  |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------|------------------|
| n <sup>++</sup> | GaAs                              | >5x10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup> | 200Å     |                  |
| N               | Iniettore                         | 4x10 <sup>16</sup> cm <sup>-3</sup>  | 547Å     | Ripetuto<br>104x |
| non drogato     | Zona attiva                       |                                      | 502Å     |                  |
| N               | Iniettore                         | 4x10 <sup>16</sup> cm <sup>-3</sup>  | 547Å     |                  |
| n <sup>++</sup> | GaAs                              | 2x10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>  | 8000Å    |                  |
| non drogato     | GaAs semi-isolante<br>(substrato) |                                      |          |                  |

Nelle tabelle 2 e 3 seguenti sono riportate rispettivamente le strutture dell'iniettore e della zona attiva che compaiono nella tabella 1.

TABELLA 2

| TIPO | COMPOSIZIONE                                | DROGAGGIO                         | SPESSORE |
|------|---|-----------------------------------|----------|
| I    | GaAs  |                                   | 103Å     |
| I    | $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ |                                   | 29Å      |
| N    | GaAs  | $4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ | 102Å     |
| I    | $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ |                                   | 30Å      |
| I    | GaAs  |                                   | 108Å     |
| I    | $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ |                                   | 33Å      |
| I    | GaAs  |                                   | 99Å      |
| I    | $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ |                                   | 43Å      |

TABELLA 3

| TIPO | COMPOSIZIONE                                | SPESSORE |
|------|---|----------|
| I    | GaAs  | 188Å     |
| I    | $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ | 8Å       |
| i    | GaAs  | 158Å     |
| i    | $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ | 6Å       |
| I    | GaAs  | 117Å     |
| I    | $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ | 25Å      |

Il campione è stato poi fabbricato in strisce (ridge) larghe circa 150 micron tramite attacco chimico ad umido fino ad esporre lo strato ad alto drogaggio. Una metallizzazione tramite evaporazione termica di Au/Ge è stata effettuata per realizzare separatamente i contatti sulle due zone ad alto drogaggio al di sopra e al di sotto della regione attiva, come in figura 1. Date le dimensioni del dispositivo si è provveduto al collegamento (bonding) a filo direttamente sui contatti sia sopra le ridge che di lato. Nel caso di ridge più sottili si renderebbe necessario l'uso di uno strato isolante per poter disporre di una più ampia superficie metallica per il bonding (vedi figura 1). Le strisce sono poi state definite in laser lunghi circa 1.2 mm tramite sfaldamento lungo piani cristallini ortogonali alle strisce. Questo lascia due faccette agli estremi di ogni striscia che fungono da spec-



chi per delimitare la cavità laser. I dispositivi sono stati saldati con una pasta di In/Ag su barrette di rame e montati in un criostato a flusso continuo di elio per le misure. Naturalmente la scelta della geometria e delle caratteristiche del risonatore non è direttamente legata al tipo di guida d'onda adottata ed altre configurazioni (cavità cilindriche, risonatori a feedback distribuito, faccette con coating dielettrico, ecc.) si possono realizzare senza alterare lo spirito dell'invenzione.

JACOBACCI & PARTNERS SpA

In figura 4 è riportato lo spettro dell'emissione da una faccetta, misurato a 8 K con un interferometro a trasformata di Fourier ed un rivelatore bolometrico di Si, in funzione della corrente di alimentazione del dispositivo. Si sono utilizzati treni di 750 impulsi (durata 200 ns, periodo 2  $\mu$ s) ripetuti con una frequenza di 333Hz. Questo è stato fatto col proposito di avere un frequenza comparabile a quella di risposta del bolometro senza tuttavia riscaldare troppo il campione. Si può osservare un picco d'emissione a circa 18 meV, in perfetto accordo con l'energia di separazione tra le prime due minibande del superreticolo. L'intensità del segnale cresce rapidamente all'aumentare della



corrente, con un progressivo restringimento della larghezza di riga, fino ad una corrente di circa 880 mA, che identifica la soglia laser. Sopra di essa la potenza aumenta di vari ordini di grandezza fino al valore massimo di alcuni mW e l'emissione si concentra in un unico modo della cavità con una larghezza inferiore al decimo di  $\text{cm}^{-1}$  (la risoluzione del nostro spettrometro).

L'andamento della potenza emessa in funzione della corrente è riportato in figura 5 per varie temperature. Ben si evidenzia il comportamento a soglia tipico dell'emissione laser, con una temperatura massima di operazione di circa 45 K.

Le prestazioni dell'esempio di dispositivo sopra descritto sono ancora piuttosto limitate, ma si sottolinea che si tratta semplicemente di una prima realizzazione sperimentale. Sono possibili infatti svariate varianti che consentiranno di ottenere futuri consistenti miglioramenti. Ad esempio, si prevede che alcune semplici soluzioni, quali la riduzione delle dimensioni laterali del dispositivo, l'utilizzo di ridge più lunghe, il rivestimento (coating) delle faccette per aumentarne la riflettività, porteranno a drastici miglioramenti in termini di potenza, massima temperatura e capacità di operare in continua. La geometria della guida

operare in continua. La geometria della guida d'onda può a sua volta essere ancora migliorata, ad esempio con l'utilizzo di regioni attive più spesse o con una diversa disposizione del contatto superiore. Di per sé tuttavia il comportamento del dispositivo oggetto dell'invenzione, quale implementato nell'esempio sopra descritto, risulta già ottimale con perdite molto contenute e larghi fattori di confinamento. La sua applicabilità a frequenze diverse e con regioni attive diverse nell'intero range 1-10 THz è garantita.

## RIVENDICAZIONI

### 1. Laser a semiconduttore comprendente:

- una regione attiva (12) che, in risposta ad un'energia di pompaggio ad essa applicata, è in grado di produrre un'emissione stimolata di radiazione con una lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) centrale nella regione dell'infrarosso lontano, ed

- almeno una regione di confinamento (16, 18, 22), atta a confinare detta radiazione in detta regione attiva (12), e comprendente almeno una interfaccia (16a, 16b, 22a) fra strati adiacenti in grado di supportare modi plasmonici di superficie generati da un'interazione dell'interfaccia con detta radiazione;

caratterizzato dal fatto che

detta almeno una regione di confinamento (16, 18, 22) comprende uno strato di guida d'onda (16), il quale è delimitato su lati opposti da una prima e da una seconda interfaccia (16a, 16b), detto strato di guida (16) essendo drogato in modo tale che dette prima e seconda interfaccia (16a, 16b) siano rispettivamente in grado di supportare detti modi plasmonici, ed essendo di uno spessore (d) tale da determinare all'esterno dello strato (16) stesso l'accumulazione di detti modi plasmonici in



corrispondenza di dette prima e seconda interfaccia (16a, 16b) ed al suo interno sostanzialmente una soppressione di detti modi plasmonici.

2. Laser secondo la rivendicazione 1, in cui detti modi plasmonici di detta prima e seconda interfaccia (16a, 16b) sono reciprocamente accoppiati.

3. Laser secondo la rivendicazione 2, in cui detto strato di guida d'onda (16) presenta una costante dielettrica ( $\epsilon_1$ ) con una parte reale negativa, ed è interposto fra regioni (12, 18) presentanti una costante dielettrica ( $\epsilon_2$ ) con una parte reale positiva ma di modulo sostanzialmente dello stesso ordine della costante dielettrica ( $\epsilon_1$ ) dello strato di guida.

4. Laser secondo la rivendicazione 3, in cui la parte reale della somma delle costanti dielettriche dello strato di guida (16) e delle regioni (12, 18) fra le quali detto strato è interposto è sostanzialmente dell'ordine della parte immaginaria di detta somma.

5. Laser secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui detta regione attiva (12) comprende una regione attiva a cascata quantica.

6. Laser secondo la rivendicazione 5, in cui detta regione attiva comprende una struttura a superreti-

... & PARTNERS SpA

coli di GaAs/ $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  a periodo non costante.

7. Laser secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui detto strato di guida (16) è interposto fra detta regione attiva (12) ed una regione di substrato (18).

8. Laser secondo la rivendicazione 7, in cui detto strato di guida d'onda (16) è a contatto con detta regione attiva (12).

9. Laser secondo una delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre una prima regione di contatto elettrico (20) disposta direttamente su detto strato di guida (16).

10. Laser secondo una delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre una seconda regione di contatto elettrico (22) disposta direttamente su detta regione attiva (12).

11. Laser secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto di produrre un'emissione stimolata di radiazione con una frequenza compresa fra 1 e 10 THz.

12. Laser secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui lo spessore (d) di detto strato di guida d'onda (16) è dell'ordine di 100 nm.

13. Laser secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui lo strato di guida d'onda (16) è for-

mato da un semiconduttore di tipo n, in cui la concentrazione di elettroni è dell'ordine di  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

PER INCARICO

ANGELO GERBINO

ISCC NO. 288B/M

JACOBACCI & PARTNERS spa.

2002 A000274

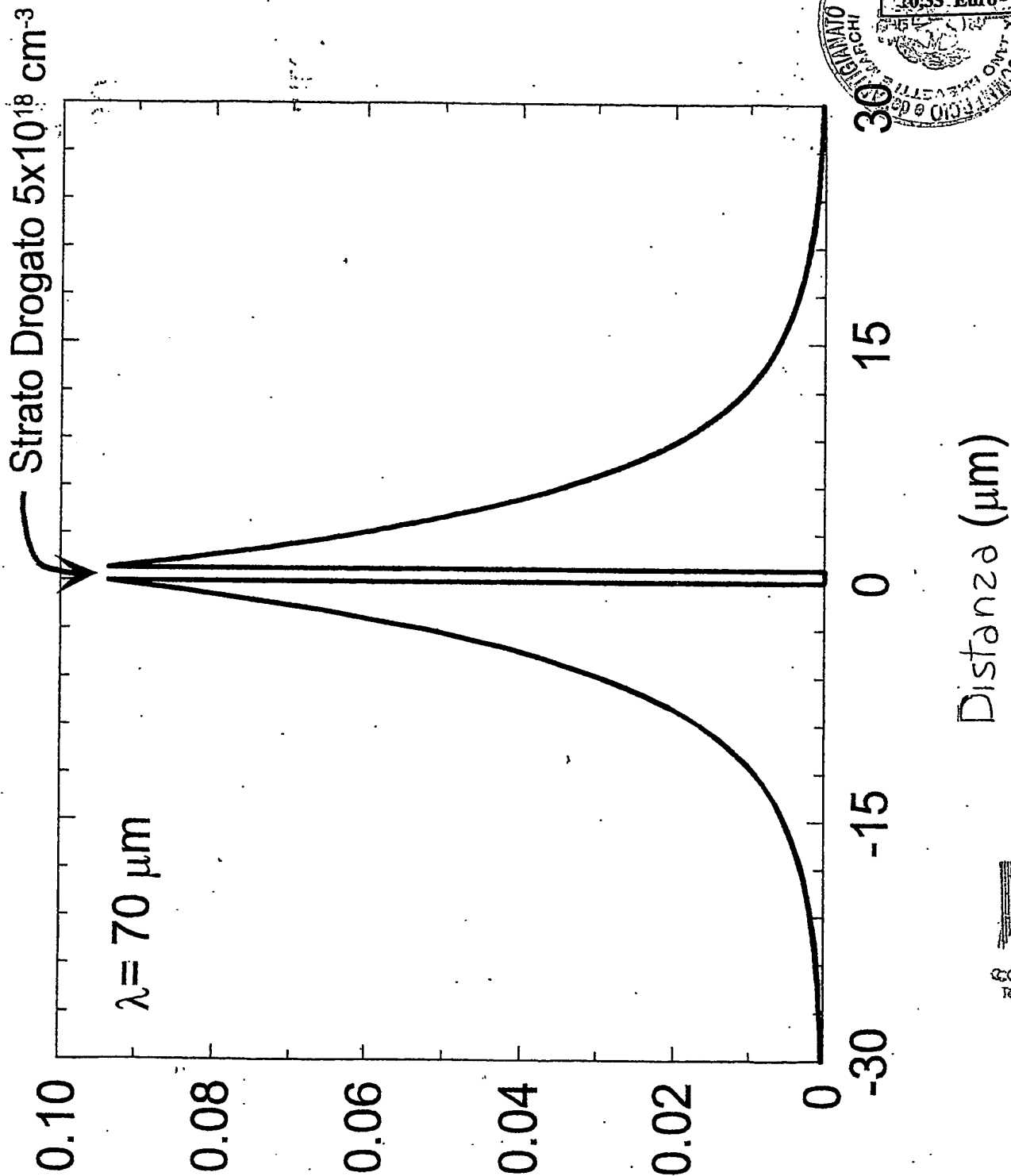


Figura 2



Intensità di modo

ANGELO GERBINO  
1988

Per incarico di:  
INFN ISTITUTO NAZIONALE PER LA FISICA DELLA MATERIA e  
UNIVERSITA' DI CAMBRIDGE

TO 2002 A000274

—  $1n = 3.521 \alpha = 17.36$

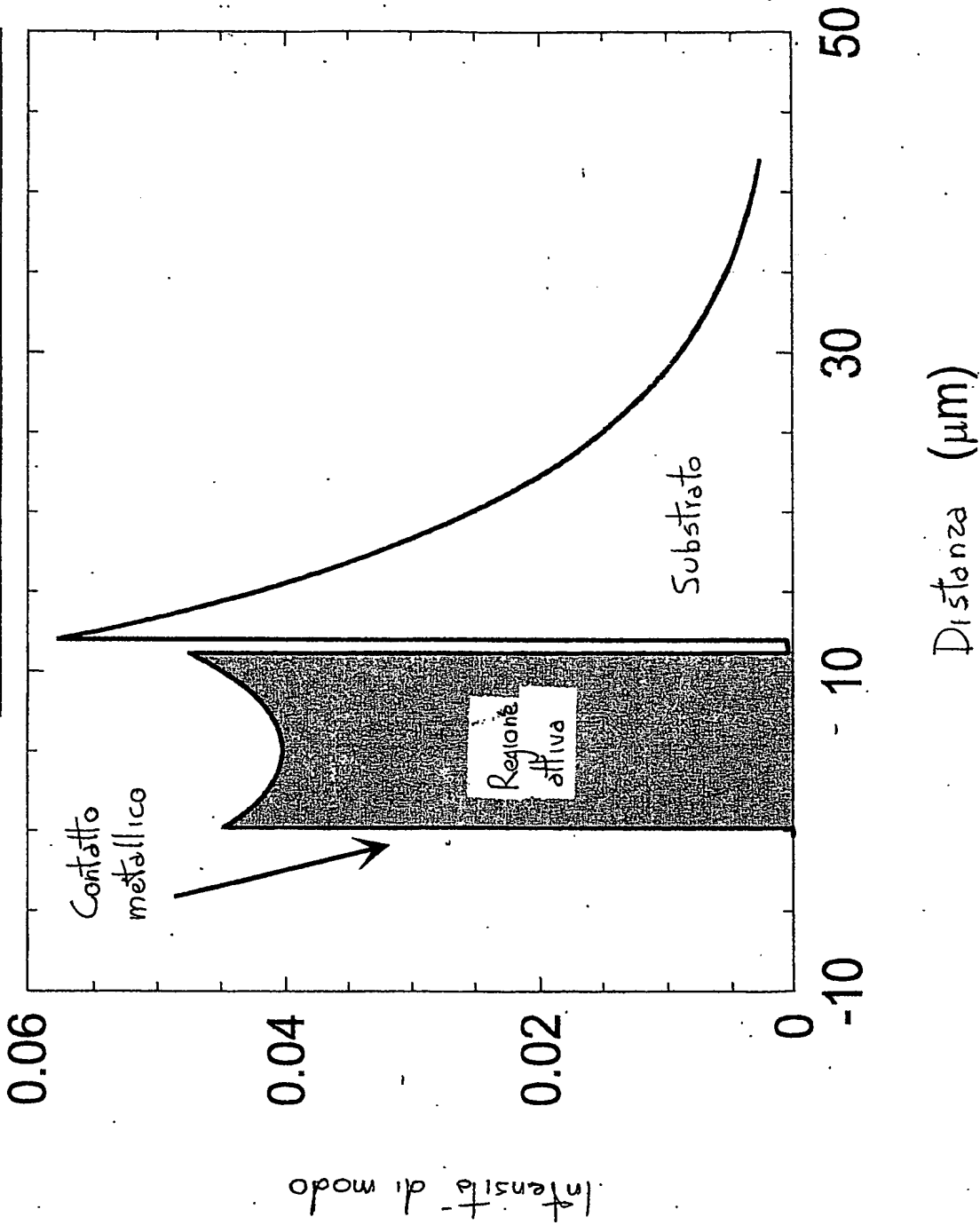


Figura 3



ANGELO GERBINO  
(Isol. No. 488BM)  
*Angelo Gerbino*



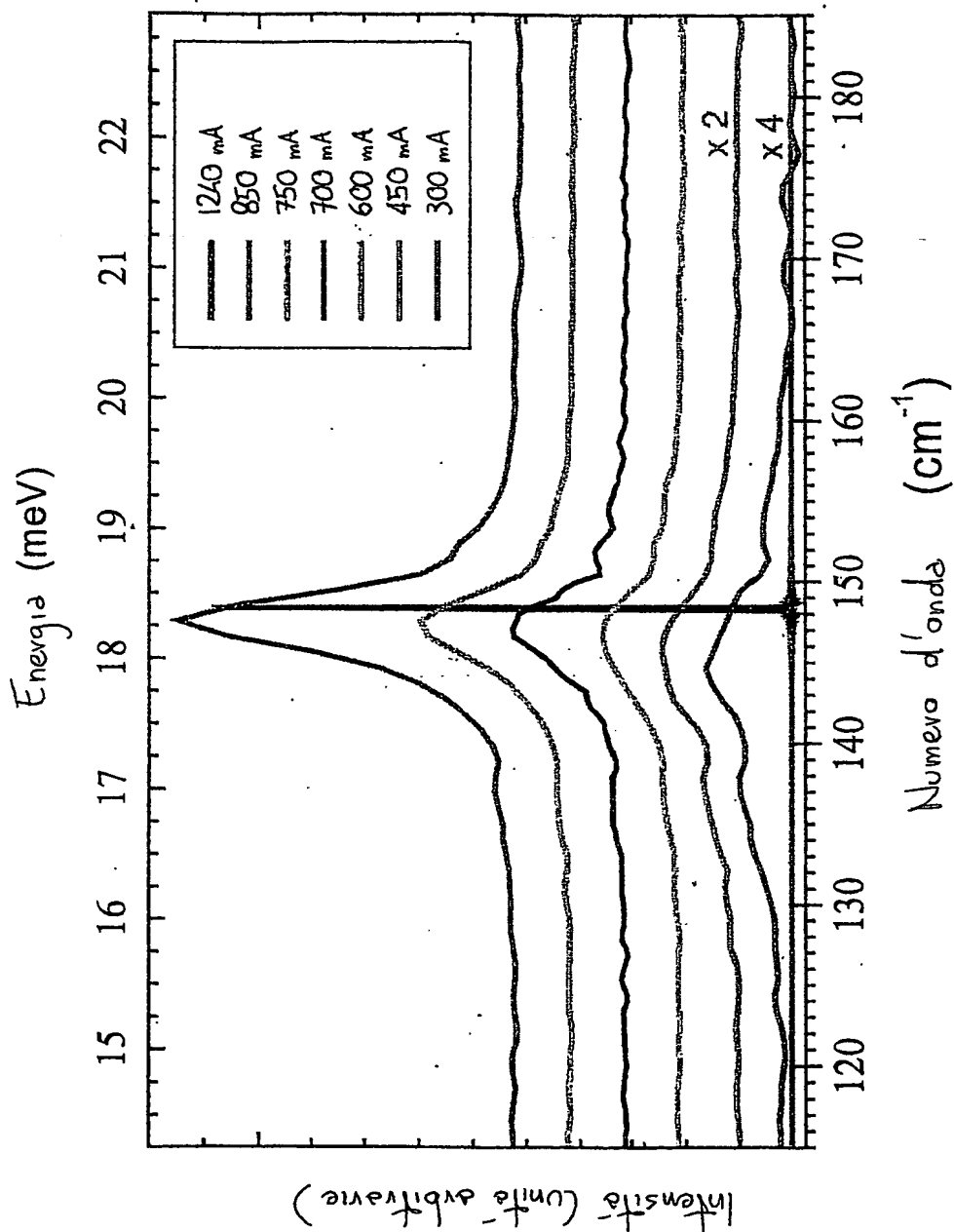


Figura 4



ANGELO GERBINO  
(scr. No. 4885M)

*Angelo Gerbino*

TO 2002 A 000274

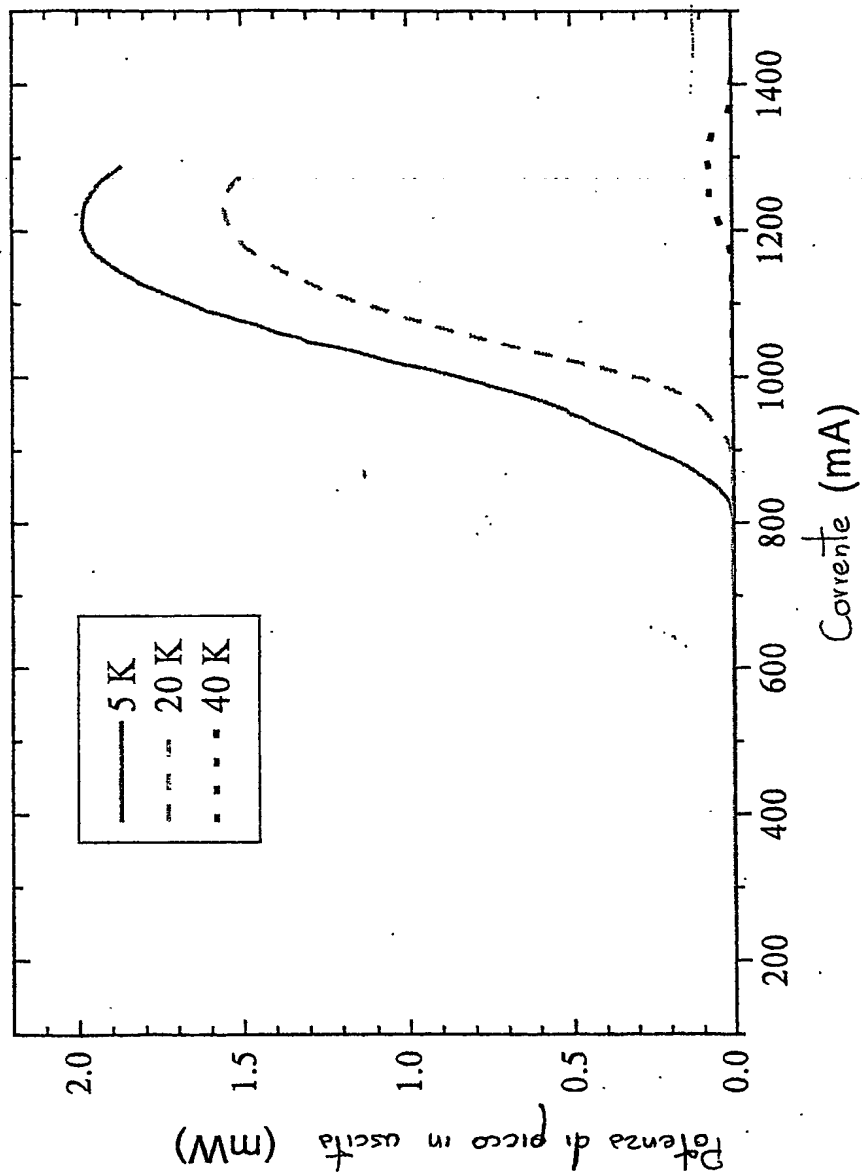


Figura 5



ANGELO GERBINO  
(scr. No. 40334)

*Angelo Gerbino*

Per incarico di:  
INFM ISTITUTO NAZIONALE PER LA FISICA DELLA MATERIA e  
UNIVERSITA' DI CAMBRIDGE

## C.C.I.A.A. DI TORINO

Verbale di deposito di istanze e documenti concernenti priorità

L'anno Duemiladue il giorno ventiquattro del mese di maggio

la Ditta/il Signor INFM ISTITUTO NAZIONALE PER LA FISICA DELLA MATERIA -  
UNIVERSITA' Dcon sede/residente in GENOVA GE ITALIA  
CAMBRIDGE CB3 0HE GRAN BRETAGNA

Rappresentato/a dai Signori Filippo Jacobacci (Iscr. N. 262BM), Guido Jacobacci (Iscr. N. 263BM), Giuseppe Quinterno (Iscr. N. 257BM), Massimo Introvigne (Iscr. N. 368BM), Paolo Rambelli (Iscr. N. 435BM), Angelo Gerbino (Iscr. N. 488BM), Fabio Siniscalco (Iscr. N. 347BM), Claudio Maggioni (Iscr. N. 113BM), Francesco Serra (Iscr. N. 90BM), Corrado Fioravanti (Iscr. N. 553BM), Paolo Ernesto Crippa (Iscr. N. 903BM), Luca Gallo (Iscr. N. 949BM) ed anche, limitatamente alla materia delle registrazioni di marchio, i Signori Enrico Riccardino (Iscr. N. 799M), Patrizia Franceschina (Iscr. N. 787M), Gabriele Borasi (Iscr. N. 684M), Sergio Mulder (Iscr. N. 683M), Silvia Lazzarotto (Iscr. N. 789M), Carlo Alberto Demichelis (Iscr. N. 800M), Franca Acuto (Iscr. N. 783M), Giulio Martellini (Iscr. N. 885M), Sylvain Rousseau (Iscr. N. 984M), Eleonora Guiotto (Iscr. N. 975M), Laura Salustri (Iscr. N. 879M), Fabiola Anna Quintavalle (Iscr. N. 981M), Lucia Vittorangeli (Iscr. N. 983M) nonché, limitatamente alla materia dei brevetti per invenzione e modelli industriali, i Signori Giorgio Long (Iscr. N. 834B), Ilaria Simonelli (Iscr. N. 859B), Edgardo Deambrogi (Iscr. N. 931B), Diego Giugni (Iscr. N. 934B), Ferruccio Postiglione (Iscr. N. 940B) della società Jacobacci & Partners S.p.A., domiciliati presso quest'ultima in TORINO, Corso Regio Parco, 27 - 10152, ed elettivamente domiciliato/a agli effetti di legge anche "ai sensi dell'art. 75, 3° c. del R.D. 29 giugno 1939, N. 1127 e dell'art. 56, 2° c. del 21 giugno 1942, N. 929", presso detti mandatarî al suddetto indirizzo della Jacobacci & Partners S.p.A. in TORINO, Corso Regio Parco, 27 - 10152

a seguito di domanda di Brev. di Invenzione depositata in TORINO in data 27  
Marzo 2002

Protocollo n. TO2002A000274

ha depositato presso questo Ufficio i sottoelencati documenti:

1) n. 5 tavole di disegni in duplice copia

2) \_\_\_\_\_

3) \_\_\_\_\_

~~Copia del presente verbale è stata consegnata all'interessato~~

p. Il depositante

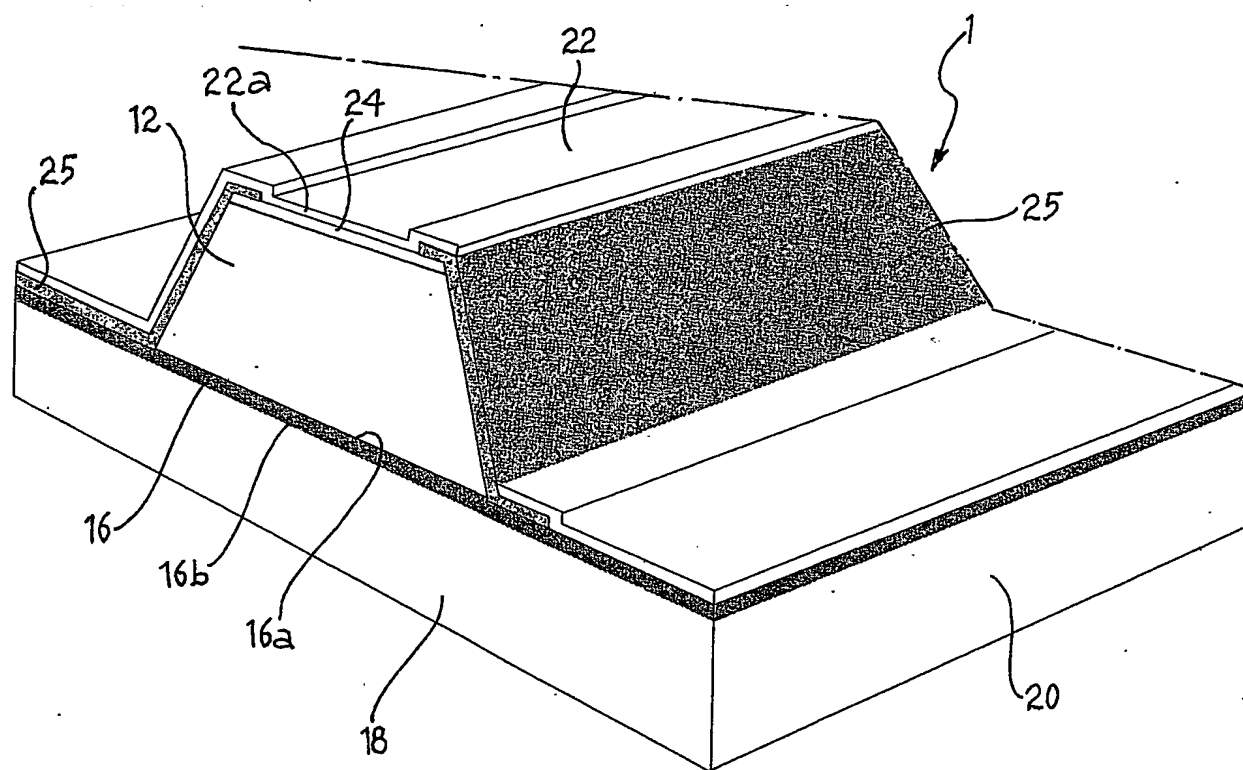
DINO CHIALI

L'ufficiale rogante

Mirella Cervera



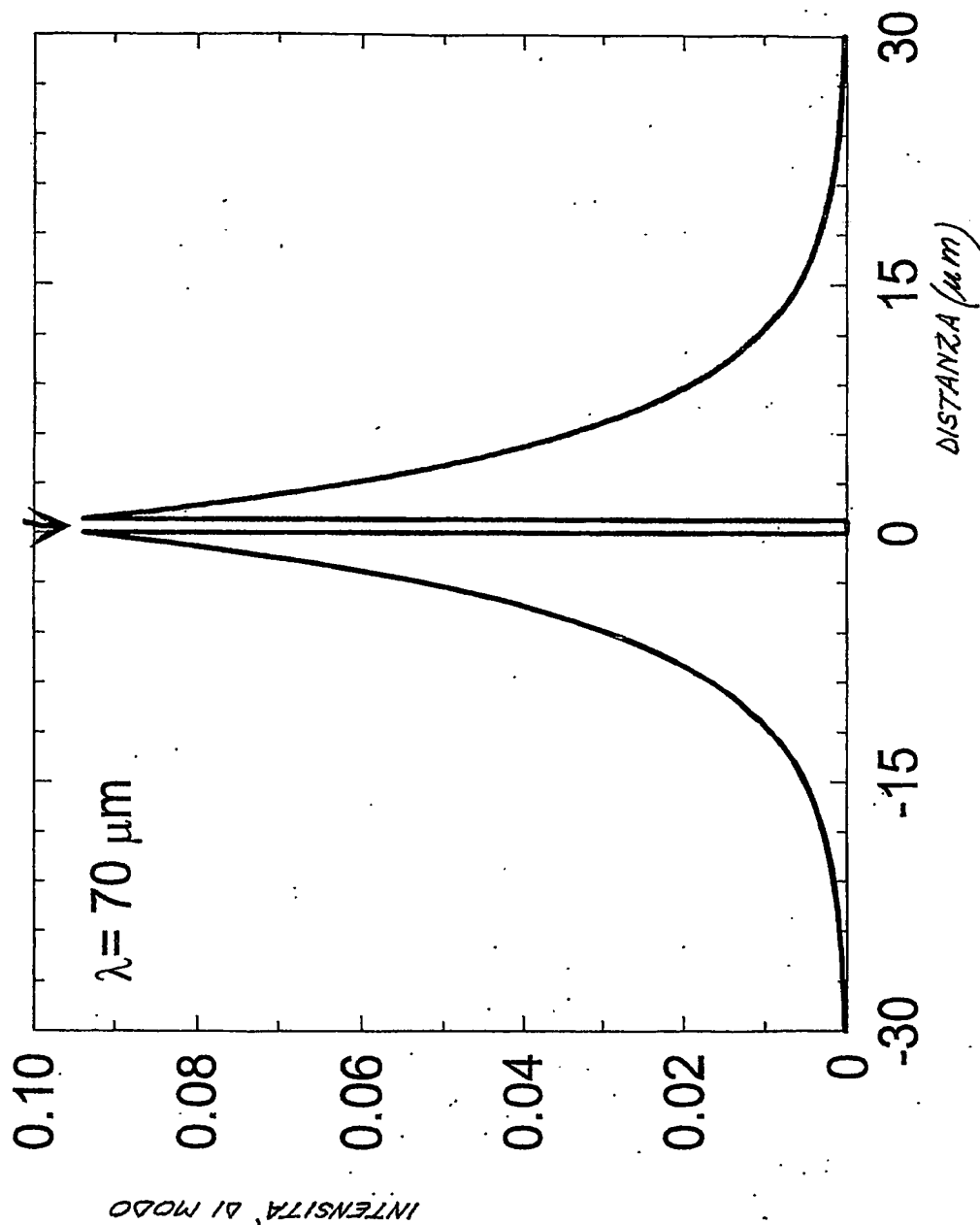
FIG. 1



CCIAA  
Milano

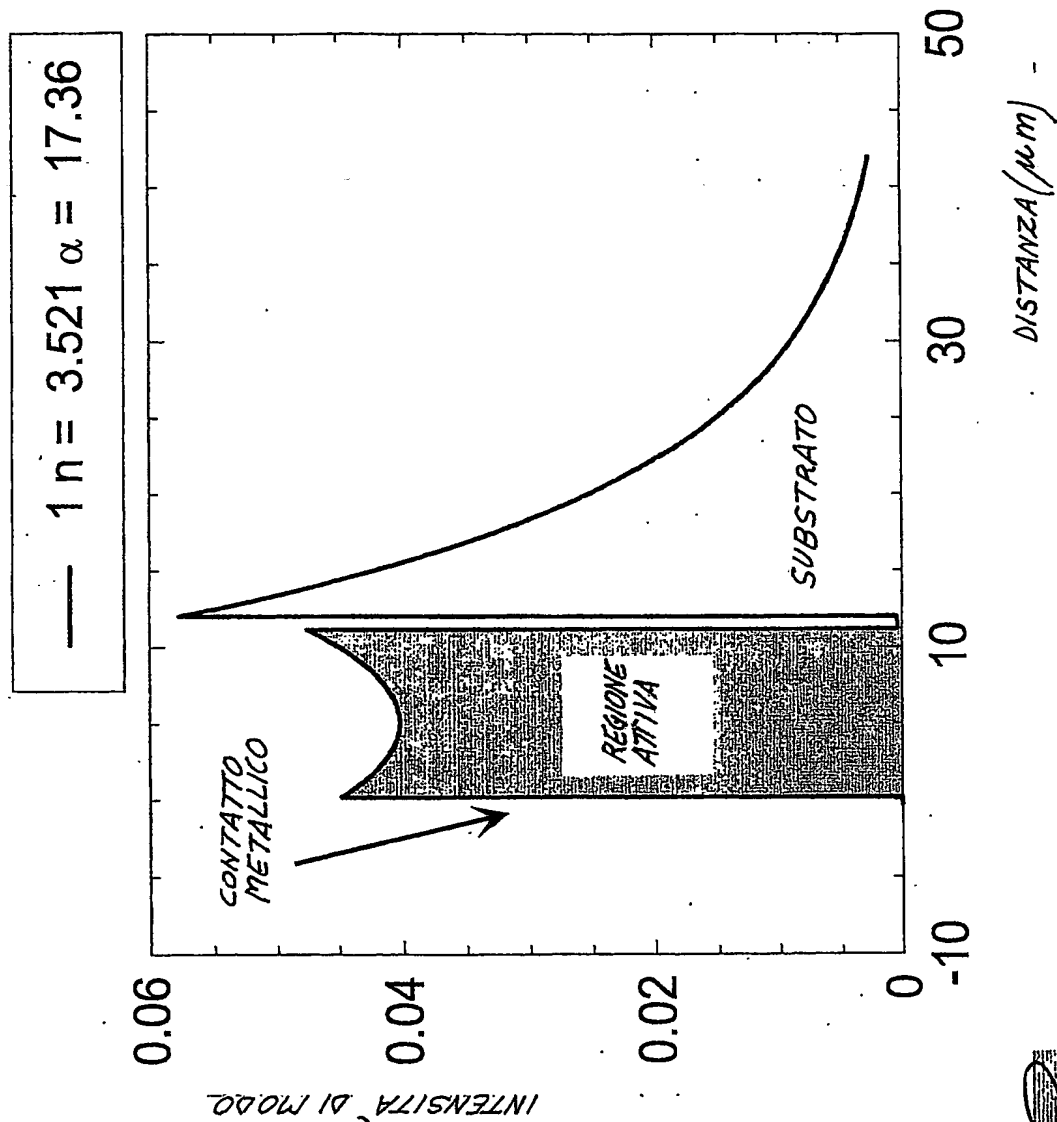
FIG. 2

STRATO DROGATO  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$



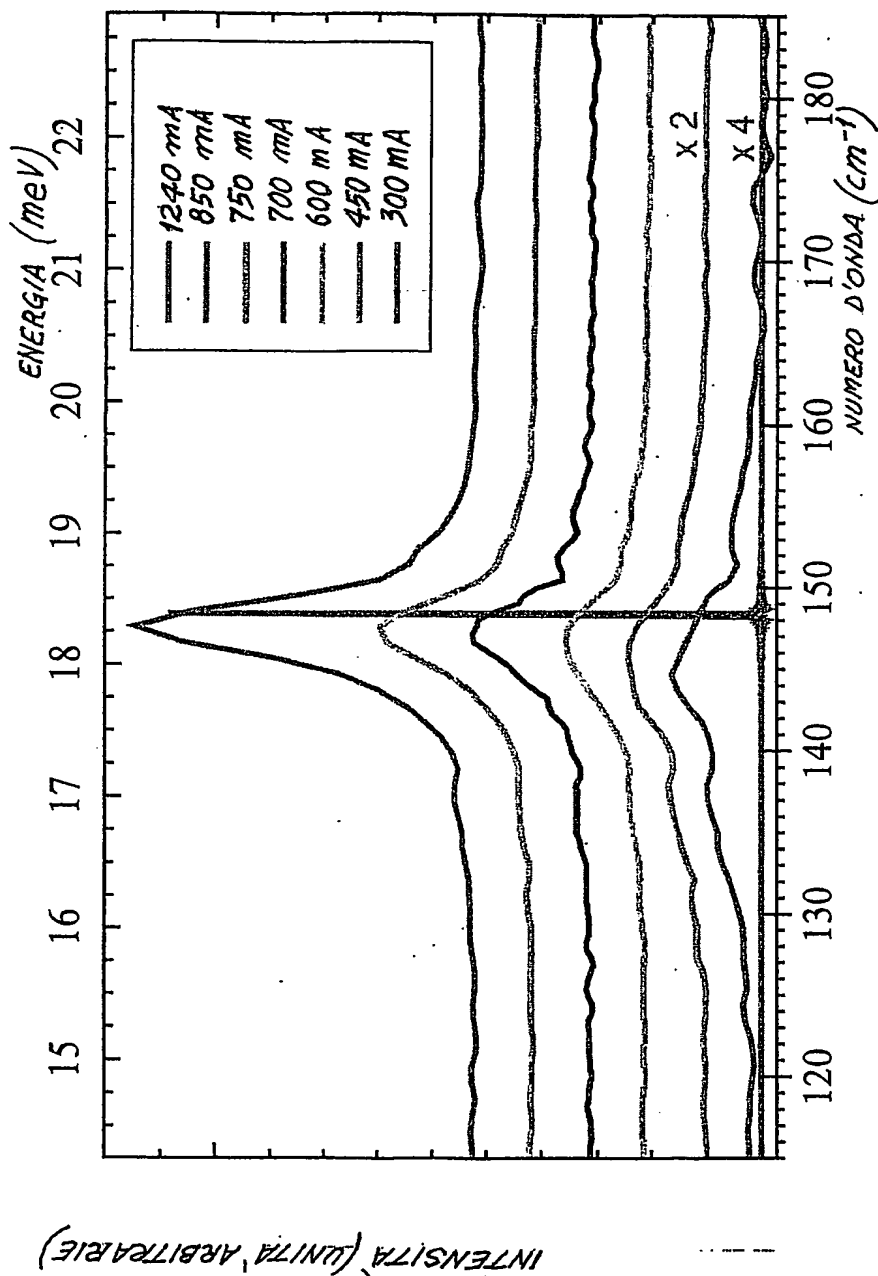
O.C.I.A.A.  
Torino

FIG. 3



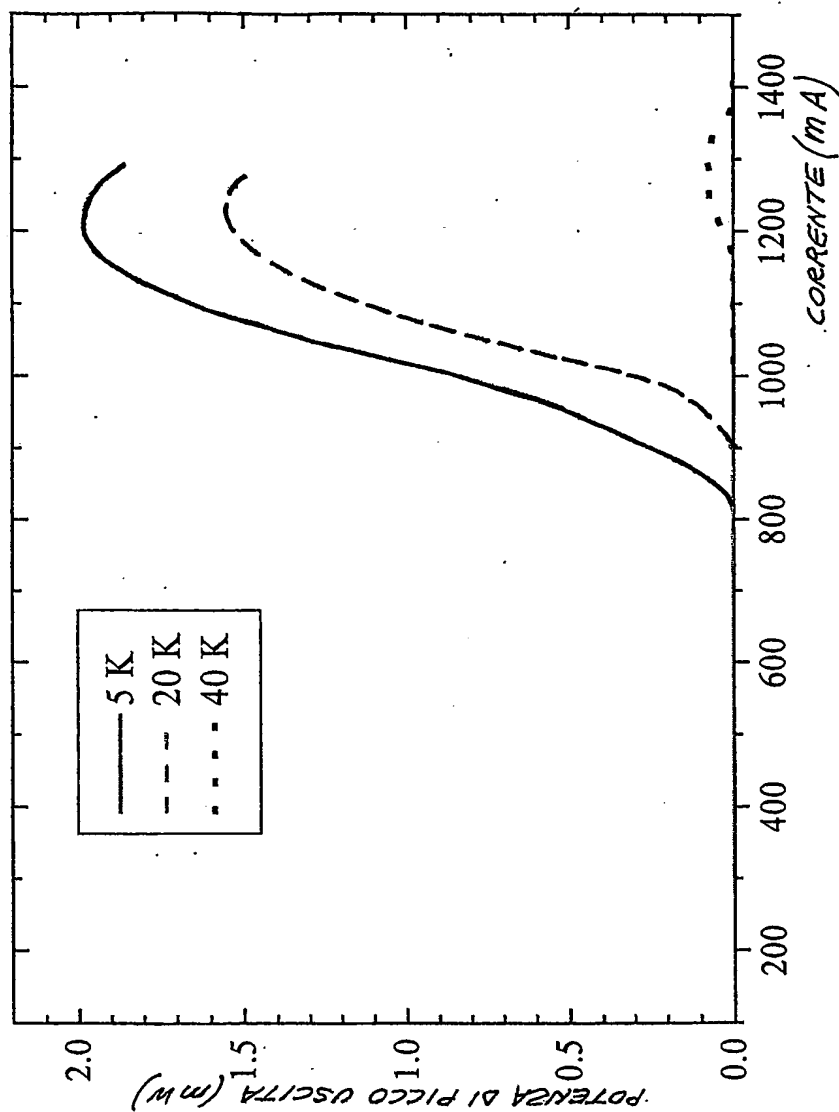
C.C.I.A.A.  
Torino

FIG.4



C.C.I.A.A.  
Torino

FIG. 5





**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☐ BLACK BORDERS

☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES

☐ FADED TEXT OR DRAWING

☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING

☐ SKEWED/SLANTED IMAGES

☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS

☐ GRAY SCALE DOCUMENTS

☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT

☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY

☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**